

ABORDANDO CONCEITOS FUNDAMENTAIS DA MECÂNICA QUÂNTICA NO NÍVEL MÉDIO[§]

(Approaching quantum mechanics fundamental concepts at high school level)

Iramaia Jorge Cabral de Paulo

Departamento de Física, Centro de Ciências Exatas e da Terra, UFMT, Cuiabá, Brasil
ira@cpd.ufmt.br

Marco Antonio Moreira

Instituto de Física da UFRGS
Caixa Postal 15051
91501-970 Porto Alegre, RS, Brasil
moreira@if.ufrgs.br

Resumo

A componente experimental do trabalho foi realizada em duas escolas de Ensino Médio da rede particular da cidade de Cuiabá, Brasil, envolvendo cerca de 100 alunos, para os quais foram ministrados conteúdos sobre os conceitos fundamentais da MQ na Interpretação de Copenhague (não determinismo e complementaridade), sendo que, numa das escolas, isso ocorreu após o ensino do tópico “ondulatória”, na perspectiva do ensino da Física Clássica, e na outra escola, antes do ensino deste tópico. Os instrumentos utilizados na avaliação da aprendizagem dos alunos, foram avaliações escritas com questões objetivas e questões abertas. Os dados obtidos foram interpretados através de análise fenomenográfica. Os resultados obtidos indicam que os alunos não apresentaram dificuldades em aprender os conceitos quânticos abordados que sejam maiores que as dificuldades em aprender conceitos clássicos. Foram também identificadas algumas concepções com relação aos conceitos de complementaridade e não determinismo que podem fornecer subsídios sobre como os aprendizes constroem uma aprendizagem potencialmente significativa sobre os conceitos fundamentais da MQ.

Palavras-chave: ensino de Mecânica Quântica no ensino médio, interpretação de Copenhague, aprendizagem significativa crítica.

Abstract

The experimental part of this work was accomplished in two secondary schools at Cuiabá, Mato Grosso State, Brazil, with approximately 100 students, by means of classes on the fundamental principles of Quantum Mechanics in the Copenhagen Interpretation (mainly non-determinism and complementarity). In one of the schools, this was performed after teaching the topic “waves”, in the perspective of the classical physics, and in the other school, before teaching this topic. The instruments employed in the assessment of the level of students' learning were made up using both open and objective written questions. The obtained data were collected and interpreted by means of the phenomenographic analysis. The findings indicate that the students did not present more learning difficulties than in the case of classical concepts. Some conceptions on complementarity and non-determinism were identified in order to find elements that may clarify the process of how the students construct a potentially meaningful learning on the fundamental concepts of Quantum Mechanics.

Keywords: teaching Quantum Mechanics in the secondary level, Copenhagen interpretation, critical meaningful learning.

[§] Trabalho apresentado no II Encontro Iberoamericano sobre Investigação Básica em Educação em Ciências, Burgos, Espanha, setembro de 2004. Aceito para publicação na Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências após novo processo de arbitragem.

Introdução

A partir da década de 90, o estudo da inserção da Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio passou a ter uma importância particular na comunidade de pesquisadores da área de Educação em Ciências, de maneira que nos dias atuais pode-se dizer que existe um autêntico movimento nesse sentido. Uma quantidade relativamente grande de trabalhos vêm sendo publicados por autores brasileiros e tal movimento já se faz sentir nas edições mais recentes de livros do Ensino Médio, tais como o de Alberto Gaspar (2000), que dedica uma seção exclusiva, no seu volume 3, à Física Moderna e Contemporânea, e Alvarenga e Máximo (1997), que abordam diversos temas da Física Moderna e Contemporânea ao longo de toda a sua obra (Ostermann e Moreira, 2000). Há que se destacar também que importantes problemas nos livros didáticos relacionados à apresentação de conceitos de forma compatível com as teorias científicas têm sido identificados por pesquisadores da área (Ostermann e Ricci, 2002), contudo, os resultados experimentais obtidos parecem confirmar que os jovens do Ensino Médio tem capacidade de abstração e maturidade suficientes para compreender os conceitos quânticos (Pinto e Zanetic, 1999), mas que uma atenção especial deve ser dada aos cursos de formação de professores, para prepará-los para a atualização curricular (Ostermann e Moreira, 2000).

Dado o volume de trabalhos publicados, começam a aparecer também na literatura artigos que se dedicam a revisões bibliográficas do movimento. Greca e Moreira (2001), por exemplo, fornecem uma importante revisão, ao analisar trabalhos publicados nas mais importantes revistas da área. Esses autores classificam os trabalhos publicados em três grupos: **i)** artigos sobre concepções dos estudantes a respeito de conteúdos de Mecânica Quântica, **ii)** trabalhos com críticas aos cursos introdutórios de Mecânica Quântica e **iii)** estudos contendo propostas de novas estratégias didáticas. No item **i)**, os autores apresentam uma lista relativamente vasta de concepções e representações diferenciadas de aprendizes de Ensino Médio e Superior sobre diversos temas específicos da Física Moderna e Contemporânea, a partir da qual pode-se concluir que existe um grande número de modelos que os aprendizes formulam para lidar com os conceitos da FMC, sendo alguns, muitas vezes, contraditórios. No item **ii)**, constata-se que o ensino da FMC ao nível superior e pós-graduação comumente é falho em diversos aspectos, levando a contradições e formação de concepções alternativas. Já no item **iii)**, a análise da literatura permite concluir que os trabalhos publicados a partir do início da década de 90 mantiveram a tendência de uma não uniformidade de posturas e proposições.

Alguns autores, classificam essas tendências em três grupos: **i)** exploração dos limites dos modelos clássicos (Gil e Solbes); **ii)** não utilização de referências aos modelos clássicos (Fischler e Lichtfeldt) e **iii)** escolha de tópicos essenciais (Arons) (Ostermann e Moreira, 2000), mas Greca e Moreira (2001) ampliam essa lista, adicionando as tendências por ênfase nos aspectos **iv)** histórico-filosóficos e **v)** experimentais. Contudo, mesmo dentro dessa classificação ampliada, as iniciativas de introdução de temas da FMC apresentam variações, alguns enfatizando mais aspectos puramente históricos, outros mais filosóficos, etc.

De um ponto de vista particular, alguns trabalhos que mantêm a postura de Arons, associando uma dificuldade fundamental na aprendizagem da Física Moderna e Contemporânea devido ao seu sofisticado aparato matemático, como o de Johnston *et al.*, (1998), da Universidade de Sydney. Por outro lado, outros trabalhos – como o de Coelho (1995), da Universidade Federal de Mato Grosso – partem de uma abordagem oposta no que diz respeito à ênfase dada ao formalismo matemático. Partem de propostas fundamentalmente conceituais, com pouca ênfase matemática, apresentando, inclusive, bons resultados experimentais no que se refere à aprendizagem conceitual (Coelho, 1995). Aparentemente, os resultados obtidos até então apontam que é plenamente possível a introdução de tópicos de Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio, desde que a proposta pedagógica não se baseie fundamentalmente num formalismo matemático avançado (Montenegro e

Pessoa Jr., 2002). De qualquer forma, outros resultados experimentais, tais como os relatados por Pietrocola and Zylbersztajn (1999), indicam que a aprendizagem de conceitos da Física Moderna e Contemporânea ocorre com dificuldade se eles não forem significativos para o seu cotidiano.

Contudo, uma das maiores dificuldades parece ser de caráter filosófico: não existe consenso, na literatura, sobre qual base filosófica a Mecânica Quântica deve ser levada ao Ensino Médio. Tal dificuldade deve-se ao fato, conforme será discutido adiante, que os próprios teóricos dessa área do conhecimento humano divergem dentre uma gama relativamente grande de diferentes interpretações (Laloe, 2001; Schreiber, 1994). Tradicionalmente, os cientistas consideram que a Mecânica Quântica é fundamentada na interpretação de Copenhagen/Bohr (ver adiante), que tem caráter não-determinista, não-causal e não-realista. Contudo, ao longo do Século XX, outras interpretações foram sugeridas - ver, por exemplo, Popper (1992) e Bohm (1983).

O problema abordado nesta pesquisa

Conforme apresentado acima, há divergências entre os pesquisadores da área de ensino, quanto a melhor forma de se levar tópicos da Física Moderna e Contemporânea ao Ensino Médio. Assim sendo, problema fundamental é: de que maneira ocorre a construção de alguns importantes conceitos quânticos na mente dos aprendizes do Ensino Médio? Naturalmente, já que é tão básico, não pretendemos respondê-lo aqui, apenas abordá-lo.

Fundamentos teóricos

Um dos conceitos centrais da obra de Bachelard é o dos *obstáculos epistemológicos* (Bachelard, 1938). Segundo Bachelard, longe da ciência desenvolver-se de forma cumulativa, existe uma espécie de descontinuidade na história das ciências, havendo períodos não propriamente de inovações, mas de reorganização do conhecimento científico.

A evolução da ciência é dificultada pelos assim chamados obstáculos epistemológicos, dentre os quais se destacam os elementos da própria ciência estabelecida, como os resultados experimentais e a própria metodologia científica.

Extrapolando para a aprendizagem de ciências na sala de aula, pode-se prever que os aprendizes devem apresentar uma certa fidelidade às suas experiências primeiras (ou deveríamos chamar de experiências do cotidiano?), relutando em aceitar que elas possam não corresponder à realidade. Numa segunda etapa, os mesmos aprendizes, havendo compreendido a aplicabilidade de uma dada lei física, podem, da mesma forma, se mostrar fidedignos a ela, não aceitando que ela possa não ser válida num determinado contexto. Assim, ao se levar em conta as considerações bachelardianas para a introdução de tópicos de Física Moderna e Contemporânea no ensino de nível médio, a lógica científica subjacente à Física Clássica deve ser rompida e abandonada. Caberia, então, ao professor do ensino médio promover uma visão não-clássica de toda a ciência? O que seria uma tarefa relativamente difícil de ser obtida, dada à formação limitada desses profissionais. Não bastaria, pois, para Bachelard, a simples *introdução* de tópicos de Física Moderna no ensino médio, mas a modificação de toda uma postura e percepção de mundo.

Como a intenção que existe permeando esta proposta investigativa é a necessidade de compreender ou propor formas mais adequadas para ensinar MQ de maneira potencialmente significativa, a Aprendizagem Significativa Crítica (Moreira, 2000, p.35) se torna relevante e à medida em que evidencia a importância, em dias atuais, de proporcionar ao educando condições para a construção de conhecimentos numa perspectiva de criticidade, de perceber o que é relevante

para a sua participação efetiva num mundo em constante e acelerada transformação de conceitos e valores. Importante ressaltar que é preciso subverter, permitir ao sujeito aprender, receber/perceber/construir e reconstruir seu conhecimento. Ao delinear os princípios de aprendizagem significativa crítica, norteadora das ações em sala de aula para de inserção da MQ no ensino médio, estamos facilitando a construção de um conhecimento que de maneira alguma é definitivo, cujos conceitos teóricos antes construídos, muitas vezes devem ser “desaprendidos”, onde o uso de metáforas e a linguagem em si devem ser cuidadas para que o conhecimento científico possa ser salvaguardado apesar de enfatizar conceitos relativos a probabilidade, dualidade, incerteza, complementaridade. Esses são os conceitos chaves da MQ, mas também, são facilitadores para a percepção da complexidade do mundo atual, onde as perguntas nem sempre poderão ser respondidas ou elaboradas através da relação causa - efeito. Onde o raciocínio probabilístico pode ser mais proveitoso do que a unilateralidade de uma só visão e a incerteza não deve ser encarada como uma angústia humana ou científica, mas como uma característica inerente ao comportamento da natureza e ao comportamento humano.

Metodologia

Este trabalho foi realizado em duas etapas, em duas escolas:

Em 2001, numa escola de ensino fundamental e médio da rede particular de ensino; uma das escolas mais conceituadas em Cuiabá, Brasil. A investigação foi realizada em três turmas de primeira série do ensino médio envolvendo cerca de 80 alunos, a faixa etária dos alunos era de 14/15 anos com pouca variabilidade, o que condiz com o esperado para esta série dentro do currículo brasileiro. Na época, a primeira autora era a professora de Física da escola e pode desenvolver uma pesquisa onde houvesse um contato de longa duração entre professor e aprendizes - um pré-requisito importante para criar condições de ocorrência da aprendizagem significativa [Novak, 1984; Moreira e Masini, 1982] - a ponto de tornar possível conhecer um pouco seu modo de pensar e ver o mundo, suas relações familiares e grupais e seus sentimentos com relação à escola e com relação à construção do conhecimento.

O tópico “Experimento de Dupla Fenda (EDF) e suas implicações filosóficas” foi incluído oficialmente no planejamento pedagógico anual da disciplina *Física* para a primeira série do ensino médio. Tal tópico foi trabalhado no segundo bimestre de 2001.

Anteriormente à abordagem desse tópico, foram ministradas aulas sobre mecânica ondulatória – que já fazia parte do currículo tradicional da escola – contudo, foi dada ênfase aos fenômenos de difração, interferência, construção histórica dos modelos sobre a natureza da luz (os quais não são normalmente enfatizados no ensino médio [de Paulo, 1997; de Paulo *et al.*, 1997]), espectro eletromagnético e o EDF (nessa seqüência). Levando-se em conta questões epistemológicas relativas à construção da concepção científica sobre a natureza da luz, optou-se pela utilização da seqüência de tópicos acima descrita, antes do EDF.

Outro aspecto importante do ponto de vista epistemológico, particularmente relacionado com a abordagem da construção histórica sobre os modelos de luz, é a questão de que a ciência é uma construção humana constituída por modelos, e não por verdades absolutas, o que é compatível com a própria filosofia da Mecânica Quântica, que estabelece princípios de incerteza e não-determinismo.

As pessoas têm uma crença pessoal – que estabelece o que é “verdade” e o que não é – e agem de acordo com ela. A percepção de que nem na ciência há uma linearidade pode contribuir para que elas passem a compreender melhor o mundo e a si mesmos (diversidade de eus) e entender

que a diversidade não pode ser um elemento de angústia, frustração, mas um fator preponderante para a compreensão do mundo.

Outro aspecto relevante foi a percepção de que os instrumentos que a ciência utiliza para detectar a realidade física não permitem a descrição do todo e que os nossos instrumentos para detectar, medir a realidade quotidiana também não caracterizam todos os aspectos de um acontecimento. Um outro aspecto discutido foi a filosofia cartesiana sob a qual a ciência se estabeleceu até o século XIX e que ainda é predominante na leitura que temos do mundo, mesmo na Física Moderna.

Tanto nessa escola, como na outra descrita abaixo, foram ministradas de 12 a 15 aulas sobre a temática abordada neste trabalho.

Em 2003, refizemos a experiência descrita anteriormente, em outra escola de ensino fundamental e médio da rede particular de ensino, com alguns diferenciais. Trabalhamos com turmas turmas de 2º ano e o livro adotado já contemplava FM, foi necessário apenas *subverter* a ordem dos conteúdos e usar um *bom argumento* para fazê-lo.

Neste ano letivo, não foram ministradas, anteriormente à MQ, aulas acerca da mecânica ondulatória, como já mencionamos, fizemos uma “troca” na ordem dos conteúdos, com o objetivo de observar o efeito do conhecimento prévio como facilitador ou impeditivo na construção do conceito de dualidade. Esse assunto também não havia sido ministrado para estes alunos no 1º ano. A pergunta, então, seria: a ondulatória clássica constitui um obstáculo epistemológico para a construção do modelo onda- partícula?

Análise de categorias

A coleta de dados foi realizada através de avaliações escritas (com questões objetivas e subjetivas). Utilizando a técnica de análise fenomenográfica (Marton, 1997) foi feita uma categorização das respostas dos textos que os alunos apresentaram nas avaliações, constituídas pelas seguintes questões:

Aprendemos que nêutrons, prótons e elétrons são partículas com carga e massa específicas, cujos valores numéricos têm sido utilizados para cálculos principalmente em Química. Entretanto, sabemos que a Mecânica Quântica descreve o caráter dual dessas partículas. Como se justifica essa dualidade? Você conhece uma evidência experimental que leva a essa conclusão? Descreva-a.

Explique com suas palavras de que forma os princípios da complementaridade, do não-determinismo e da probabilidade são evidenciados no experimento imaginário do gato de Schrödinger.

Foram dados, em sala de aula, alguns exemplos de casos de nosso cotidiano que podem ilustrar o colapso da função de onda. Crie o seu exemplo.

Pense sobre a frase: “Fulano é bom e mau ao mesmo tempo”. Essa frase faz sentido para você?

Numa primeira etapa, foi feita uma leitura de todas as respostas dos alunos das duas escolas destacando-se aspectos diferenciados (ou semelhantes) com que os aprendizes se reportavam ao assunto abordados. Verificou-se que as respostas dos alunos poderiam ser classificadas em ordem crescente com relação ao grau de aproximação entre o conceito apresentado pelo aluno e o compartilhado pela comunidade científica acerca da Interpretação de Copenhagen. Evidenciou-se que algumas respostas eram mais próximas às concepções da Física Clássica e outras à Mecânica Quântica à luz da Interpretação de Copenhagen.

Com relação ao conceito de complementaridade, foram identificadas as seguintes categorias, exemplificadas com palavras dos alunos:

Soma das partes diferente do todo: Alguns alunos assimilaram que aspectos antagônicos compõem um todo, se auto-interferem resultando em algo diferente da simples soma das partes.

“...associando a dupla fenda, um nêutron passa pela fenda A e pela fenda B. Nêutron passando pela fenda A, Ψ_A , e nêutron passando pela fenda B, Ψ_B . A interferência ocorre porque a onda associada ao nêutron, tal qual a luz, passa por ambas as fendas. Assim Ψ_A interfere com Ψ_B e o que acontecerá com o nêutron após passar pelas fendas dependerá da interferência entre os estados”.

(aluno M-4)

Superposição de estados quânticos: Convivência harmônica entre os opostos. Os alunos admitem que os opostos podem conviver simultaneamente, constituindo a totalidade de um objeto ou fenômeno.

“O mundo como um todo é formado por conceitos antagônicos e muitas vezes incompreensíveis para as mentes clássicas. A Mecânica Quântica não foge desse conceito.”

(aluno M-2)

“... existe a possibilidade de o gato estar vivo e morto ao mesmo tempo. Porque a partir do momento em que o gato entra na caixa, não posso saber se ele tomou ou não tomou o veneno, por isso ele pode estar vivo e morto.”

(aluno A-8)

Interação sujeito-objeto: Os aspectos antagônicos de um objeto têm um valor relativo dependendo de quem e de como o fenômeno é observado.

“Da mesma forma que a luz tem comportamento de onda e de partícula, as pessoas também podem ter comportamentos diferentes em situações e proposições diferentes. Essa afirmação, para ser verdadeira, depende de nós mesmos, do modo como a analisamos.”

(aluno B-6)

“Se ele estiver ajudando alguém, por exemplo, tirando dinheiro de um rico para dar a um pobre, para o rico será mau, mas para o pobre será bom. Relacionando esse exemplo à onda-partícula, um instrumento poderá ver só um lado, ou de onda, ou de partícula.”

(aluno N-1)

Colapso da função de onda: Alguns alunos destacam o fato de que uma medida faz com que o estado, ou função de onda, se colapse, destruindo a totalidade do objeto.

“Ao se medir a localização de uma onda-partícula, sua propriedade ondulatória desaparece, resultando numa resposta ao experimento, ou seja, qualquer que seja a tentativa de localizar a onda-partícula, tem como consequência a destruição de sua propriedade ondulatória.

(aluno C-4)

Incompreensibilidade: Alguns aprendizes simplesmente dizem que a Física Quântica é incompreensível, e que não se deve tentar compreendê-la, mas simplesmente aceitá-la.

“Não se deve justificar a dualidade. Deve-se aceitá-la”.

(aluno J-2)

Separação do mundo clássico e quântico: Essa concepção admite que as particularidades do mundo quântico (dualidade, complementaridade, não-determinismo) valem apenas para o microscópico, não sendo aplicáveis ao seu cotidiano.

“Não acredito que uma pessoa é boa e má ao mesmo tempo. Isso não existe. Agora, em relação à luz faz sentido, porque ele se comporta como onda e partícula ao mesmo tempo”.
(aluno L -6)

Clássico/probabilístico: Nessa categoria, alguns aprendizes parecem tentar conciliar os princípios quânticos com concepções prévias clássicas, dizendo que não propriamente aspectos antagônicos que coexistem, mas diferentes probabilidades. Por exemplo, não teríamos o gato (de Schrödinger) vivo e morto ao mesmo tempo antes de abrir a caixa, mas a probabilidade do gato vivo coexistindo com a probabilidade do gato morto, como classicamente quando se considera que, ao atirar uma moeda, se tem 50% de probabilidade de dar cara ao mesmo tempo em que se tem 50% de probabilidade de dar coroa.

“O gato, ao entrar na caixa contendo comida e veneno, tem duas possibilidades que podem ocorrer com ele depois de estar lá dentro (vivo + morto). O gato ao entrar na caixa está vivo e morto ao mesmo tempo, pois o interior da caixa abrange essas duas possibilidades, e que eliminando uma delas a outra prevalecerá. Se o gato morre, certamente não estará vivo, óbvio. Então existe essa possibilidade, assim como o contrário também. A experiência está relacionada às probabilidades existentes. Está associada às probabilidades”.
(aluno C-11)

Clássico/livre-arbítrio: Alguns outros acreditam que os acontecimentos são determinados pelo observador, ou seja, que as coisas acontecem simplesmente pelas atitudes das pessoas. As diferentes probabilidades relacionadas a um evento estão simplesmente relacionadas a fatores externos.

“Com os meus atos, eu posso aumentar ou diminuir a probabilidade de uma coisa acontecer ou não”.
(aluno J-9)

“...isso quer dizer que devo fazer opções, escolher uma das coisas que quero, porém, perdendo outras.”
(aluno M-15)

“...com relação a um desempregado, por exemplo, há 50% de chance dessa pessoa conseguir emprego. Se essa pessoa pesquisar, correr atrás de um trabalho, ela estará aumentando as chances de conseguir um emprego. E se essa pessoa não se importar e não correr atrás de seu objetivo, a possibilidade de não conseguir um emprego aumentará. Portanto, cabe a cada um aumentar ou diminuir as chances de uma conquista”.
(aluno J-9)

Com relação ao conceito de não-determinismo, as respostas dos alunos levam a categorias similares às elencadas para o conceito de complementaridade. Entretanto, o que se percebe é que eles se reportam quase sempre ao experimento de Schrödinger para referirem-se ao não determinismo. Contudo, não foi observado o aparecimento das categorias: **Soma das partes diferente do todo, Superposição de estados quânticos, Interação sujeito-objeto, Incompreensibilidade, Separação do mundo clássico e quântico**, sendo identificada uma nova categoria **Clássico/ignorância**, vamos a elas:

Colapso da função de onda

“...ao colocarmos o gato dentro da caixa, há a possibilidade dele estar vivo ou morto, logo não saberemos ao certo, pois se abriremos a caixa finalizamos o experimento.”

(aluno C-8)

Clássico/probabilístico

“ A partir do momento em que o gato é colocado na caixa é possível que se faça a escolha entre tirar o gato e ter a certeza de que ele está vivo, ou que ele permaneça na caixa fazendo com que a probabilidade de ele estar vivo ou morto fique em 50 %.”

(aluno W-2)

Clássico/livre-arbítrio:

“...se o gato vai viver ou morrer depende da nossa escolha, com a caixa fechada não dá para saber se o gato está vivo ou morto, portanto ele está vivo e morto ao mesmo tempo, mas quando tomamos a decisão de abrir a caixa logo depois se anula a alternativa de morte felina.”

(aluno T-3)

Clássico/ignorância: As incertezas se devem simplesmente à nossa ignorância sobre os fatores que determinariam algum resultado.

“...para nós, o gato, está vivo e morto ao mesmo tempo, não podemos saber o que vai acontecer ao certo.

(aluno R-4)

“No experimento de Schrödinger ele diz que o gato está vivo e morto ao mesmo tempo porque a partir do momento em que o gato entra na caixa, não pode se saber se ele tomou ou não tomou veneno, por isso, ele pode estar tanto vivo como morto”.

(aluno P-4)

As frequências de respostas às perguntas abertas foram computadas, de acordo com as categorias descritas, sendo que os resultados são apresentados na Figura 1 e Tabela 1:

Tabela 1: Número de respostas segundo cada categoria identificada nas respostas dos alunos às questões abertas.

	Categoria	Número de respostas
1C	Soma das partes diferente do todo	19
2C	Superposição de estados	22
3C	Interação sujeito-objeto	8
4C	Colapso da função de onda	26
5C	Incompreensibilidade	8
6C	Separação mundo clássico/quântico	3
7C	Clássico probabilístico	6
8C	Clássico/livre-arbítrio	14
1D	Colapso da função de onda	12

2D	Clássico probabilístico	21
3D	Clássico/livre-arbítrio	17
4D	Clássico/ignorância	7

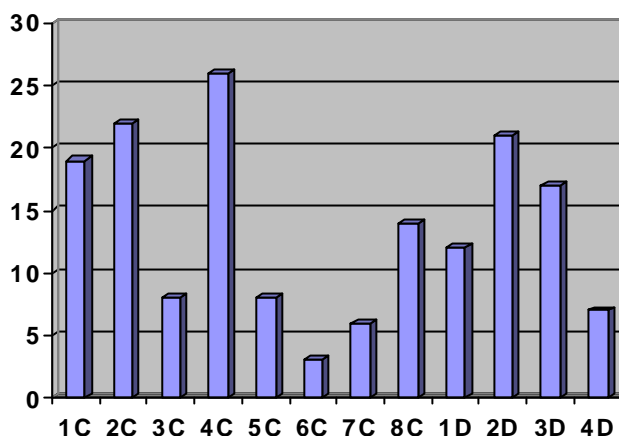


Figura 1: Número de respostas segundo cada categoria descrita na Tabela I.

Conforme pode ser observado na tabela e na figura, há uma fração apreciável de alunos que parecem apresentar uma boa compreensão sobre os conceitos abordados de acordo com a Interpretação de Copenhague, uma vez que há um número significativo de respostas nas categorias 1C, 2C, 3C, 4C e 1D. Contudo, há também uma parcela da amostra que chama a atenção por indicar que os conceitos clássicos e quânticos podem acomodados conjuntamente (categorias 7C, 6C, 2D, 3D e 4D). E uma parcela menor dos alunos, classificados nas categorias 5C e 6C, parecem acreditar que a Teoria Quântica é mesmo incompreensível ou que existe uma separação reificada entre o conhecimento clássico e quântico.

A guisa de conclusão

As evidências sugerem que os alunos aprenderam estruturando conceitos importantes para a compreensão do mundo quântico. É possível verificar isso pelos depoimentos, respostas a questionários abertos e fechados e por relações conceituais estabelecidas em mapas conceituais: diferenciação entre a Física Clássica e a Física Quântica, correlação da quântica com os conceitos de probabilidade, indeterminismo e complementariedade, constatação de que tanto a luz quanto prótons, neutros e elétrons são ondapartículas e a ligação da Física Quântica com elementos do cotidiano. Além disso, outro aspecto importante observado é que os alunos, após a aplicação da metodologia didática, parecem adquirir consciência de que a ciência não é constituída por verdades absolutas.

Na primeira escola foram ministradas aulas introdutórias sobre mecânica ondulatória onde as características e classificações de ondas foram tratadas, equações fundamentais e espectro eletromagnético. Entretanto, os resultados indicam que a abordagem parece não influenciar criticamente a compreensão e construção dos conceitos quânticos uma vez que este tratamento clássico não foi repetido na segunda escola e os resultados foram bastante similares. Surgem então

novas questões que merecem ser investigadas com profundidade: os alunos aprenderam significativamente a FC ou esta não constitui de fato um obstáculo epistemológico para aprendizagem da física quântica? Se os alunos não aprendem significativamente a FC talvez ela não constitua um obstáculo epistemológico, não necessitando se desaprendida do ponto de vista da Aprendizagem Significativa Crítica, essas hipóteses serão melhor investigadas posteriormente em estudos que darão continuidade a este.

Com relação aos conceitos de não-determinismo e complementaridade foi possível identificar categorias de respostas com relação a questionários abertos. Basicamente o que pode ser inferido é que alguns alunos apresentam categorias próximas aos princípios quânticos mas salientando aspectos específicos da teoria quântica: ou o colapso da função de onda é enfatizado preferencialmente, ou a interação sujeito-objeto ou a superposição de estados, ou ainda a soma das partes diferente do todo. Outros alunos demonstram uma tendência em tentar compatibilizar os princípios da teoria quântica com concepções clássicas por diferentes maneiras: alguns afirmam que o livre arbítrio das pessoas **determina** o que vai acontecer; outros que o que ocorre não é uma superposição de estados mas uma superposição de probabilidades (por exemplo, o gato não estaria vivo e morto ao mesmo tempo, mas o que coexiste é a probabilidade dele estar vivo e a probabilidade de ele estar morto); outros, afirmam que a coexistência dos opostos é apenas uma manifestação da nossa ignorância com relação ao real estado existente; outros ainda, afirmam que os princípios da quântica se aplicam apenas ao mundo microscópico.

Com relação ao ambiente ensino-aprendizagem promovido na escola, ensinar Física Quântica ou qualquer outro tópico de Física, parece mesmo inviável sem fazer ligações com o cotidiano, os alunos parecem não se interessar pelo conhecimento científico se não lhes é mostrada a ponte possível entre este e o mundo em redor, até porque eles mesmos fazem esta extrapolação independentemente da ênfase que o professor dá a este quesito. Contudo, este fato que observamos em sala de aula enquanto pesquisadores, estabelece outros limites com relação a suposições teóricas de Arons, Fischeler/ Lichtfeldt e Gil/Solbes, referidas antes, a respeito da relação entre a FC e a MQ. O problema é que se não há uma orientação com maior acuidade por parte do educador estas extrapolações poderão acontecer de maneira errônea gerando uma aprendizagem que pode ser significativa mas inadequada. Este fato aumenta a responsabilidade dos educadores ao tentar implementar novos tópicos no currículo escolar, porque não se deve perder a cientificidade em detrimento de abordagens cotidianas, novamente, reforçamos a necessidade de melhor selecionar conteúdos curriculares e a real necessidade da abordagem de alguns tópicos da Física. Há que se repensar a formação dos professores que atuam nas escolas de educação básica. Mais do que conjecturas, a teoria educacional precisa de aplicabilidade, extrapolando a academia. No Brasil e em muitos outros lugares, teorias servem para teorizar, a prática é outra história.

Referência

Alvarenga, B. e Máximo, A. (1997) *Curso de física*. 4.ed., São Paulo: Scipione.

Bachelard, G. (1938) - *A Formação do Espírito Científico* - Editora Contraponto, Rio de Janeiro, Ed. 1996.

Bohm, D. (1983) – *Wholeness and the implicate order* – Ark Paperbacks, London.

Coelho, J.V. (1995) - “*Física Moderna no Ensino de Nível Médio*” - Dissertação de Mestrado - Instituto de Educação - Universidade Federal de Mato Grosso.

Gaspar, A. (2000) – *Física* – Editora Ática, São Paulo.

Greca, I.M. y Herscovitz, V.E. (2002) – Construyendo significados en mecánica cuántica: fundamentación y resultados de una propuesta innovadora para su introducción en el nivel universitario - *Enseñanza de las Ciencias*, vol.20, No.2, 327-338.

Greca, I.M. e M.A.Moreira (2001) - Uma revisão da literatura sobre estudos relativos ao ensino da mecânica quântica introdutória - *Investigações em Ensino de Ciências*, vol.6, No.1 - <http://www.if.ufrgs.br/public/ensino/revista.htm>

Johnston, I.D., K.Crawford and P.R.Fletcher (1998) – Student difficulties in learning quantum mechanics – *International Journal of Science Education*, vol.20, No.4, 427-446.

Laloe, F. (2001) - Do we really understand quantum mechanics? Strange correlations, paradoxes, and theorems – *American Journal of Physics*, vol. 69(6), 655.

Montenegro, R.L. e Pessoa Jr., O. (2002) - Interpretações da teoria quântica e as concepções dos alunos do curso de física – *Investigações em Ensino de Ciências*, vol.7, No.2 - <http://www.if.ufrgs.br/public/ensino/revista.htm>

Moreira, M.A. e Masini, E.F.S. (1982) - *Aprendizagem Significativa, A Teoria de David Ausubel* - Editora Moraes - São Paulo.

Moreira, M.A. (2000) – *Aprendizagem Significativa Subversiva* – Atas do III Encontro Internacional sobre Aprendizagem Significativa, Peniche, Portugal – 11 a 15 de setembro de 2000.

Marton, f. (1997). Phenomenography. In Keeves, J.P. (Ed.). *Educational Research, Methodology, and Measurement: An International Handbook*. UK, Elsevier Science.

Novak, J.D. (1984) – *Aprender a Aprender* – Plátano Edições Técnicas – Lisboa.

Ostermann, R. e Ricci, T.F. (2002) – Relatividade restrita no Ensino Médio: contração de Lorentz-Fitzgerald e aparência visual de objetos relativísticos em livros didáticos de Física – *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* – vol.19, No.2, 176-190.

Ostermann, F. e Moreira, M.A. (2000) – Física contemporânea en la escuela secundaria: una experiencia en el aula involucrando formación de profesores – *Enseñanza de las Ciencias*, vol.18, No.3, 391-404.

Ostermann, F. y Moreira, M.A. (2000) - Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa "física moderna e contemporânea no ensino médio" - *Investigações em Ensino de Ciências*, vol.5, No.1 - <http://www.if.ufrgs.br/public/ensino/revista.htm>

Pessoa Jr, O. (1997) – Interferometria, interpretação e intuição: uma introdução conceitual à Física Quântica – *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol.19, No.1, 27-47.

Pessoa Jr, O. (2000) – Complementing the Principle of Complementarity – *Physics Essays*, vol.13, No.1, 50-66.

Pietrocola, M. and Zylbersztajn, A. (1999) – The use of the Principle of Relativity in the interpretation of phenomena by undergraduate physics students – *International Journal of Science Education*, vol.21, No.3, 261-276.

Pinto, A.C. e Zanetic, J. (1999) – É possível levar a Física Quântica para o Ensino Médio? - *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, vol.16, No.1, 7-34.